

Hormigón de altas prestaciones con agente expansivo a base de magnesio curado internamente mediante cenizas de fondo de carbón como reservorio de agua

Internally cured high performance concrete with magnesium based expansive agent using coal bottom ash particles as water reservoirs

Roberto Rodríguez-Álvaro^a, Belén González-Fonteboa^{*b}, Sindy Seara-Paz^c y

Khandaker M. Anwar Hossain^d

^a PhD Student. Universidade da Coruña. roberto.rodriguez1@udc.es

^b Associate Prof. Dr. Civil Engineering School. Universidade da Coruña. belen.gonzalez.fonteboa@udc.es

^c Associate Prof. Dr. Civil Engineering School. Universidade da Coruña. gumersinda.spaz@udc.es

^d Prof. Dr. Ryerson University. Professor. ahossain@ryerson.ca

RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado el efecto de dos estrategias para la reducción de la retracción en hormigones de altas prestaciones con una baja relación agua/cemento. Estas estrategias son el curado interno, utilizando cenizas de fondo de carbón como reservorios de agua, y el uso de un agente expansivo a base de óxido de magnesio. Han sido estudiadas de manera separada y conjunta en tres condiciones de curado distintas: sellado, secado al aire e inmersión en agua. Los resultados obtenidos permiten concluir que el curado interno favorece la hidratación del agente expansivo, siendo efectivo el uso combinado de las dos estrategias en hormigones con una baja relación agua/cemento.

ABSTRACT

In this work, the effect of two shrinkage reduction strategies in high performance concrete with a low water to cement ratio has been studied. These strategies are: internal curing, via saturated coal bottom ash as water reservoirs, and the use of a magnesium based expansive agent. Their effect has been studied together and individually in three curing conditions: sealed, air-drying and water immersion. Based on obtained results, it can be concluded that internal curing can promote hydration of the expansive agent. Therefore, the combined use of both strategies is effective in concrete with a low water to cement ratio.

PALABRAS CLAVE: Retracción, curado interno, agente expansivo de magnesio, ceniza de fondo de carbón.

KEYWORDS: Shrinkage, internal curing, magnesium based expansive agent, coal bottom ash.

1. Introducción

La estabilidad volumétrica del hormigón es una condición fundamental a tener en cuenta desde el momento de su diseño. Diferentes fenómenos pueden hacer que el hormigón experimente deformaciones que generan tensiones internas si se restringe la libertad de movimiento. Estas tensiones pueden producir fisuras que permiten

la entrada en el hormigón de agentes potencialmente dañinos afectando a su durabilidad [1].

Las deformaciones en el hormigón pueden ser de signo positivo (incremento de volumen, como hinchamiento o expansión) o de signo negativo (reducción de volumen, es decir,

retracción) y algunas de ellas pueden no producirse en función de la composición del hormigón y las condiciones del ambiente al que está expuesto.

Los cambios en el volumen externo de un elemento de hormigón se conocen como deformaciones autógenas cuando son consecuencia directa de la propia composición del material, sin importar las condiciones ambientales en las que se encuentra, su forma o su tamaño. Este tipo de deformaciones pueden ser de signo positivo (hinchamiento autógeno) o negativo (retracción autógena) y son consecuencia de diferentes procesos físicos y químicos.

La hidratación del cemento es la fuerza motriz de la retracción autógena. La humedad relativa interior del hormigón decrece debido a la progresiva hidratación del cemento [2]. Este proceso se conoce como auto-deseccación y, cuando es lo suficientemente intenso, causa retracción autógena [3–5]. La auto-deseccación es más frecuente e intensa en hormigones con una baja relación agua/cemento, como es el caso de los hormigones de altas prestaciones (HAP) [3,6,7]. La ratio de hidratación del cemento se reduce conforme avanza el tiempo, por lo que la retracción autógena es más significativa durante los primeros días tras el amasado.

Cuando se permite la interacción del hormigón con el ambiente, el gradiente de humedad fuerza la evaporación del agua no combinada. El movimiento del agua hacia el exterior genera presiones en los poros que producen una reducción del volumen exterior, llamada retracción por secado. El mecanismo que la gobierna es análogo al que explica la retracción autógena por auto-deseccación [8]. Relaciones agua/cemento altas y una baja humedad relativa ambiental favorecen la retracción por secado [9,10]. Su magnitud está relacionada con la forma y el tamaño del elemento en cuestión, ya que la evaporación de agua no es homogénea a través de una misma sección [11–14].

Las formas de retracción mencionadas, y otras que quedan fuera del alcance de este trabajo, pueden coexistir en probetas de laboratorio y en elementos de construcción reales, dependiendo de su tamaño y forma y del ambiente al que están expuestos. Entre las posibles estrategias que se pueden utilizar para reducir la retracción, algunas de las más populares son [2,15]: el uso de materiales cementantes suplementarios poco reactivos, el refuerzo con fibras, el curado interno, los aditivos reductores de retracción y los agentes expansivos.

En cuanto a los agentes expansivos, los más conocidos son los compuestos principalmente por sulfoaluminatos de calcio ($C-\bar{S}-A$), óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO).

El óxido de magnesio está presente en el cemento Portland en forma de periclasa, que tiene su origen en impurezas de magnesita de la piedra caliza usada como materia prima para su fabricación. En este caso, la magnesita, que es un mineral formado principalmente por carbonato magnésico ($MgCO_3$) es sometida a temperaturas superiores a los 1400 °C. De este modo, se produce un MgO poco reactivo que solo llega a expandirse tras largos periodos de tiempo, lo que puede causar fisuras y problemas de durabilidad en el hormigón a edades tardías [16]. Sin embargo, el MgO puede obtenerse mediante una calcinación a menor temperatura, el cual es capaz de expandirse a edades más tempranas.

El mecanismo expansivo del MgO implica su hidratación, produciendo hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) con un volumen un 117 % mayor que el del MgO [16].

Las investigaciones sobre el MgO calcinado a baja temperatura empezaron cuando se observó que no aparecían fisuras debidas a la retracción térmica en la presa china de Baishan. Este hecho fue atribuido al uso de un cemento Portland con un alto contenido en MgO que había sido calcinado a una temperatura inferior a la habitual [24]. Desde entonces, el MgO

calcinado a temperaturas bajas de manera intencionada ha sido utilizado para fabricar agentes expansivos conocidos como agentes expansivos a base de magnesio (AEM). Los AEM más comunes tienen un alto contenido en MgO, ya que son obtenidos a partir de magnesita pura extraída en cantera. Diversas variantes de AEM se utilizan para compensar la retracción autógena [17,18], la retracción térmica en laboratorio [19,20] y en obra [21], e incluso muestra propiedades auto-sanantes [17,22,23].

En comparación con los agentes expansivos a base de sulfoaluminato u óxido de calcio, la principal ventaja del AEM es la reducida cantidad de agua que necesita para hidratarse y por consiguiente expandirse y la gran estabilidad del producto de reacción, el hidróxido de magnesio [18].

Otra estrategia que puede reducir la retracción autógena es el curado interno. El curado interno consiste en el aporte de agua a una mezcla cementante utilizando áridos ligeros saturados, u otros materiales que liberen agua desde sus partículas, mitigando así la auto-desección y manteniendo la hidratación [31]. Estas partículas saturadas son también conocidas como reservorios de agua. Los áridos ligeros y los polímeros superabsorbentes están entre los elementos más comúnmente utilizados como reservorios de agua para curado interno [32]. Esta estrategia de reducción de la retracción es especialmente útil en hormigones con una baja relación agua/cemento, como son los HAP. El agua en el HAP es escasa para la hidratación del cemento, y este tipo de hormigón no se puede curar externamente de manera efectiva debido a su baja permeabilidad [33].

El uso de AEM no parece ser una buena opción para este tipo de hormigón, ya que necesita una cierta cantidad de agua para hidratarse. Sin embargo, el uso simultáneo de curado interno y AEM parece una combinación prometedora, ya que el primero podría proveer al segundo con el agua necesaria para expandirse.

Solo unos pocos estudios han explorado esta opción [34].

2. Materiales y dosificaciones

Como reservorios de agua para curado interno, se han utilizado cenizas de fondo de carbón (CFC), un residuo granular poroso generado en las centrales térmicas que usan este combustible. Como el curado interno afecta a un mayor volumen de pasta cuando se utilizan reservorios de agua de pequeño tamaño [35], las partículas de CFC se han tamizado hasta conseguir un tamaño máximo de 4 mm (**Figura 1**). Las CFC tienen una densidad de 1.19 g/cm³ y una absorción de agua del 36.66 % tras 24 h. La arena convencional utilizada es de machaqueo con un tamaño máximo de 4 mm, una densidad de 2.47 g/cm³ y una absorción de agua del 2.43 % tras 24 h. Ambos materiales granulares tienen una granulometría y un módulo granulométrico similares, siendo estos 2.33 para la CFC y 2.78 para la arena convencional.

Como ligante principal, se ha utilizado cemento Portland (OPC) con una densidad de 3.12 g/cm³. Además, también como ligante, se ha usado un AEM obtenido por calcinación de magnesita pura con un tamaño máximo de partícula de 100 µm a 900 °C durante 2 h. Este procedimiento ha sido tomado de otro estudio realizado por Mohamed A.A.Sherir et al. [23]. Pequeñas muestras de 2.7 kg, divididas en tres contenedores distintos, fueron quemadas al

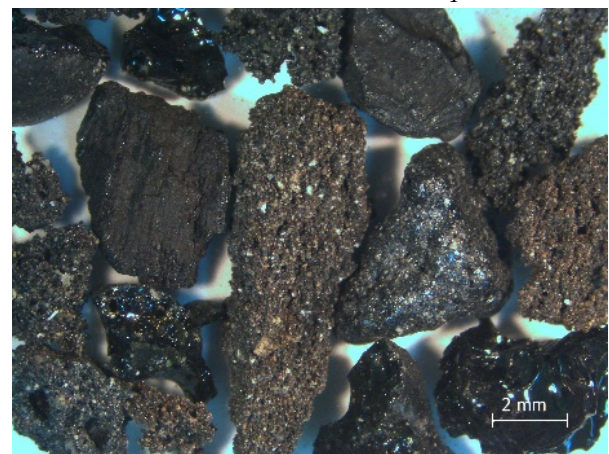


Figura 1: Algunas partículas de CFC.

mismo tiempo para garantizar una calcinación homogénea (hasta una pérdida por calcinación media del 34 %). El compuesto resultante es básicamente óxido de magnesio (MgO) con un tamaño medio de partícula de 3.25 μm y una densidad de 3.58 g/cm^3 . Después de la calcinación, los contenedores fueron cuidadosamente retirados de la mufla y el AEM fue extendido en bandejas de aluminio para asegurar el rápido enfriamiento del material (**Figura 2**). Tras un periodo de enfriamiento de 15 min, se guardó el AEM en tarros de vidrio dentro de una caja sellada que contenía cal sodada y gel de sílice, materiales granulares con una gran capacidad de absorción de agua. El procedimiento de enfriado y conservación es muy importante porque el óxido de magnesio es un compuesto inestable que puede reaccionar fácilmente con la humedad ambiental.

Se ha utilizado un aditivo superplastificante (SP) para conseguir morteros fluidos con comportamiento autocompactante. Su densidad es de $1.05 \pm 0,02 \text{ g}/\text{cm}^3$, con un residuo sólido del $20.3 \pm 1 \%$.

Para estudiar el efecto del curado interno y del AEM, se han diseñado 6 mezclas de la fase mortero de un HAP. El AEM sustituye al OPC en 2 proporciones: 3 % y 5 % en volumen, de manera que ambos materiales pulverulentos se



Figura 2: Obtención del AEM

consideran formando parte del ligante. La mitad de las mezclas contienen CFC como reservorios de agua para curado interno. Este material es introducido en el mortero sustituyendo al 30 % de la arena convencional en volumen.

La relación agua de amasado (AM)/ligante permanece constante para todas las mezclas, siendo igual a 0.8 en volumen. La dosificación del SP es de un 0.8 % (residuo sólido/OPC) en volumen.

La arena convencional y la CFC se saturaron 24 h antes del amasado con la cantidad de agua correspondiente a su capacidad de absorción de agua tras 24 h. Esta agua que se encuentra dentro de las partículas actúa como agente de curado interno (ACI). La cantidad de ACI en la arena convencional es mucho menor que en las partículas de CFC, ya que estas últimas tienen una capacidad de absorción de agua mucho mayor. Las dosificaciones de las mezclas resultantes se describen en la **Tabla 1**.

3. Métodos de ensayo

La deformación lineal y el cambio de masa unitario se han medido utilizando probetas de dimensiones 25x25x285 mm^3 (con una longitud efectiva de 250 mm), de acuerdo con la norma UNE 80112 [36]. Las probetas fueron expuestas a tres condiciones de curado distintas: sellado con papel de aluminio (**Figura 3**), secado al aire en un ambiente con una humedad relativa del 50 % e inmersión en agua. La temperatura se mantuvo constante en todas las condiciones de curado a $24 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Tanto la deformación lineal como el cambio de masa unitario se han medido desde las 18 h tras el amasado, cuando las probetas fueron desmoldadas. Esta edad de desmoldado, más temprana de lo habitual (las probetas para este ensayo suelen desmoldarse a las 24 h), ha sido elegida para tomar la medida inicial lo más pronto posible desde el final del fraguado.

Tabla 1: Dosificaciones (kg/m³)

	OPC	AEM	Arena	ACI-Arena	CFC	ACI-CFC	AM	SP
AEM0-CFC0	923	0	1112	27	0	0	252	15
AEM3-CFC0	896	32	1112	27	0	0	252	15
AEM5-CFC0	878	53	1112	27	0	0	252	15
AEM0-CFC30	923	0	778	19	161	59	252	15
AEM3-CFC30	896	32	778	19	161	59	252	15
AEM5-CFC30	878	53	778	19	161	59	252	15

4. Resultados y discusión

4.1 Curado sellado: retracción autógena

En esta condición de curado la retracción registrada se considera retracción autógena, ya que no existe intercambio de humedad entre las probetas y el ambiente.

La mezcla sin curado interno ni AEM (AEM0-CFC0) es la que presenta la mayor deformación, como puede verse en la **Figura 4**.

La retracción autógena es menor cuando se aplica el curado interno, ya que mitiga la auto-desección. Por su parte, la expansión del AEM también compensa la retracción autógena. Este efecto, sin embargo, solo es visible durante los primeros días tras el desmoldado si el curado interno no es aplicado. Para este caso, no hay una mejora proporcional de la retracción autógena a 28 días cuando se aumenta la cantidad de AEM del 3 % al 5 %. AEM3-CFC0 muestra casi la

misma retracción autógena a 28 días que AEM5-CFC0. El HAP parece no ser capaz de aportar suficiente agua al AEM para expandirse. Sin embargo, las CFC saturadas pueden aportar esta necesaria agua extra. Prueba de ello es la mejora de AEM5-CFC30 sobre AEM3-CFC30, de 84µe a 28 días. El agua disponible en las mezclas sin curado interno no es suficiente ni siquiera para hidratar todo el AEM en las mezclas con un contenido del 3 %. Esto puede afirmarse tras comprobar que se ha registrado una compensación de 228 µe a los 28 días de AEM3-CFC30 sobre AEM0-CFC30, y una bastante inferior, de 116 µe, de AEM3-CFC0 sobre AEM0-CFC0.

El curado interno es una estrategia de reducción de la retracción que juega un doble papel en el HAP con AEM. No solo contribuye a la reducción de la retracción autógena sino también a su compensación aportando agua extra para la hidratación del AEM. Este efecto sinérgico beneficioso ha sido también detectado en otros trabajos [65]



Figura 3: Probetas para medición de retracción autógena, selladas con papel de aluminio

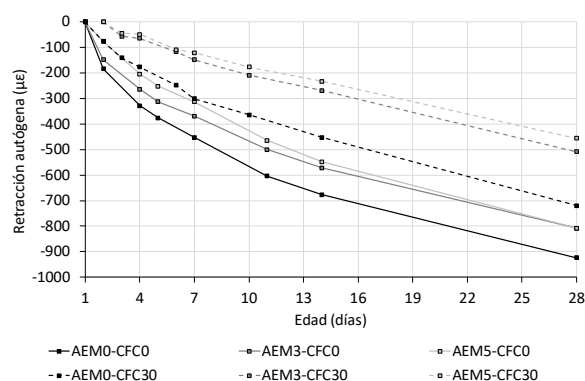


Figura 4: Retracción autógena (µe)

4.2 Curado secado al aire: cambio unitario de masa y retracción

Los morteros pierden agua por evaporación cuando son sometidos a la condición de curado de secado al aire. Esta pérdida de agua se registra como pérdida de masa. La pérdida de masa es especialmente destacada durante los primeros días tras el desmoldado, y tiende a estabilizarse a edades tempranas debido a la elevada ratio superficie/volumen de las probetas utilizadas (**Figura 5**).

Las mezclas con curado interno pierden más masa porque contienen una mayor cantidad de agua. La presencia del AEM aumenta ligeramente la pérdida de masa en las muestras con curado interno.

Estas pérdidas de agua se traducen en una continua retracción (**Figura 6**). Los morteros curados internamente retraen más que los que no lo son. También se distingue la tendencia a una mayor retracción en los morteros con AEM, al

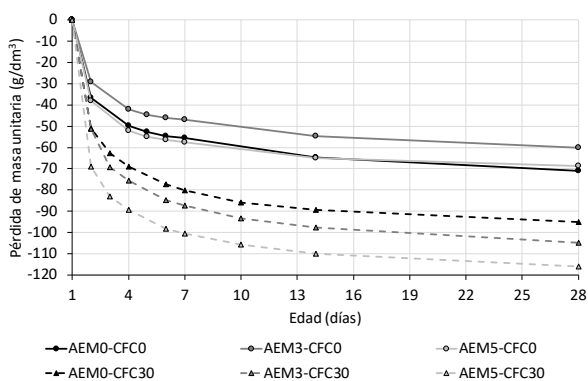


Figura 5: Pérdida de peso unitaria en condición de curado secado al aire (g/dm^3)

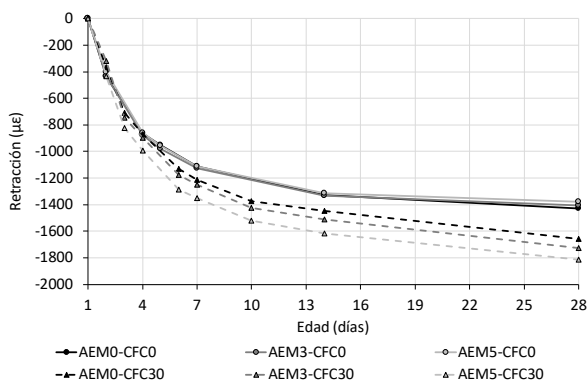


Figura 6: Retracción en condición de curado secado al aire ($\mu\epsilon$)

menos cuando se usa en combinación con CFC.

Durante el primer día tras el desmoldado (desde la primera medida hasta la edad de 2 días), para la misma pérdida de masa, la retracción es mayor en las mezclas sin curado interno que en las mezclas con curado interno. Por ejemplo, AEM0-CFC0 presenta una ratio retracción/pérdida de masa unitaria de $11.92 \mu\epsilon/(\text{g}/\text{dm}^3)$ mientras que su homóloga con curado interno presenta un valor de $7.13 \mu\epsilon/(\text{g}/\text{dm}^3)$ para la misma ratio. Esta diferencia es debida a que la auto-desección coexiste con el secado como fenómeno causante de retracción en la condición de curado secado al aire. Podemos concluir esto porque, en base a los resultados obtenidos en la condición de curado sellado, sabemos que el curado interno mitiga la auto-desección.

4.3 Curado por inmersión en agua: ganancia unitaria de masa, hinchamiento y expansión

Cuando las probetas de mortero se sumergen en agua tras el desmoldado, absorben agua de manera continuada que puede ser registrada como una ganancia de masa. Esta ganancia de masa no es constante, sino que se produce una absorción drástica durante los primeros días, continuando a un ritmo más lento a edades más avanzadas (**Figura 7**). La ganancia de agua es muy similar para todas las mezclas.

El agua absorbida durante la inmersión satura los poros del mortero e interactúa con los

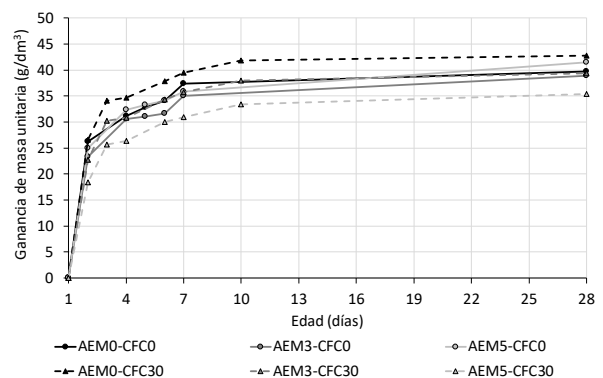


Figura 7: Ganancia unitaria de masa en condición de curado por inmersión en agua (g/dm^3)

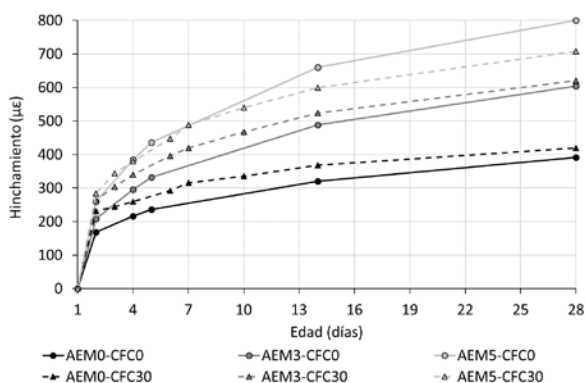


Figura 8: Hinchamiento en condición de curado por inmersión en agua ($\mu\epsilon$)

dos ligantes utilizados y sus productos de hidratación. Estos dos procesos, uno físico y otro químico, contribuyen a un continuo aumento de longitud en todas las probetas (**Figura 8**).

El curado interno no tiene efecto sobre este hinchamiento porque las probetas mantienen una humedad relativa muy elevada en su interior, impidiéndose de este modo la desorción del agua de curado interno. Como era esperado, cuando mayor es el contenido en AEM, mayor es la expansión debido a su efectiva hidratación en esta condición de curado.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado el efecto combinado sobre el hormigón de altas prestaciones (HAP) de dos estrategias de reducción de la retracción: el curado interno, utilizando cenizas de fondo de carbón saturadas como reservorios de agua, y el uso de un agente expansivo a base de magnesio (AEM). Los resultados obtenidos permiten presentar las siguientes conclusiones:

- El bajo contenido en agua del HAP limita la expansión del AEM, pero el curado interno puede aportar el agua extra necesaria para este propósito. El efecto sinérgico entre las dos estrategias de reducción de la retracción es eficaz para compensar la retracción autógena.

- Si la evaporación de agua no se evita, tanto el uso del AEM como el del curado interno separada o conjuntamente hace que la retracción aumente.
- El AEM se expande de manera efectiva cuando el HAP está inmerso en agua, teniendo un efecto despreciable el curado interno en esta condición de curado.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto HACCURACEM (BIA2017-85657-R), financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los retos de la Sociedad, en el Marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, Convocatoria 2017. Agradecemos también a la Ryerson University (Toronto, Canadá) en cuyas instalaciones se desarrolló la parte experimental de este trabajo durante una estancia predoctoral financiada por la Xunta de Galicia. Finalmente, destacamos la colaboración de las empresas Votorantim Cimentos y Grupo BASF, por la aportación de algunos de los materiales empleados en la investigación.

Referencias

- [1] K. Wang, D.C. Jansen, S.P. Shah, A.F. Karr, Permeability study of cracked concrete, *Cem. Concr. Res.* 27 (1997) 381–393.
- [2] L. Wu, N. Farzadnia, C. Shi, Z. Zhang, H. Wang, Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review, *Constr. Build. Mater.* 149 (2017) 62–75. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.064.
- [3] E. Holt, Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 464–472. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.009.
- [4] P. Lura, O.M. Jensen, K. Van Breugel, Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms Modeling

- of autogenous relative humidity change and autogenous, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 223–232.
- [5] B. Persson, Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete, *Cem. Concr. Res.* 28 (1998) 1023–1036. doi:10.1016/S0008-8846(98)00068-4.
- [6] V. Baroghel-Bouny, P. Mounanga, A. Khelidj, A. Loukili, N. Rafai, Autogenous deformations of cement pastes: Part II. W/C effects, micro-macro correlations, and threshold values, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 123–136. doi:10.1016/j.cemconres.2004.10.020.
- [7] Z. Jiang, Z. Sun, P. Wang, Autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1539–1545. doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.028.
- [8] J. Zhang, D. Hou, Y. Gao, Integrative Studies on Autogenous and Drying Shrinkages of Concrete at Early-Age, *Adv. Struct. Eng.* 15 (2012) 1041–1051. doi:10.1260/1369-4332.15.7.1041.
- [9] X. Hu, Z. Shi, C. Shi, Z. Wu, B. Tong, Z. Ou, G. de Schutter, Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components, *Constr. Build. Mater.* 149 (2017) 406–415. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.113.
- [10] J. Yang, Q. Wang, Y. Zhou, Influence of Curing Time on the Drying Shrinkage of Concretes with Different Binders and Water-to-Binder Ratios, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017 (2017) 1–10. doi:10.1155/2017/2695435.
- [11] M. Vinkler, J.L. Vitek, Drying shrinkage of concrete elements, *Struct. Concr.* 18 (2017) 92–103. doi:10.1002/suco.201500208.
- [12] M. Ba, C. Qian, H. Wang, Effects of specimen shape and size on water loss and drying shrinkage of cement-based materials, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 28 (2013) 733–740. doi:10.1007/s11595-013-0761-y.
- [13] J. Liu, N. Farzadnia, C. Shi, X. Ma, Effects of superabsorbent polymer on shrinkage properties of ultra-high strength concrete under drying condition, *Constr. Build. Mater.* 215 (2019) 799–811. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.237.
- [14] A. Dönmez, Z.P. Bažant, Shape factors for concrete shrinkage and drying creep in model B4 refined by nonlinear diffusion analysis, *Mater. Struct. Constr.* 49 (2016) 4779–4784. doi:10.1617/s11527-016-0824-6.
- [15] K. Kovler, S. Zhutovsky, Overview and future trends of shrinkage research, *Mater. Struct. Constr.* 39 (2006) 827–847. doi:10.1617/s11527-006-9114-z.
- [16] C. S., Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead-burnt CaO and MgO, *Cem. Concr. Res.* 25 (1995) 51–56.
- [17] M.A.A. Sherir, K.M.A. Hossain, M. Lachemi, Self-healing and expansion characteristics of cementitious composites with high volume fly ash and MgO-type expansive agent, *Constr. Build. Mater.* 127 (2016) 80–92. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.125.
- [18] L. Mo, M. Liu, A. Al-Tabbaa, M. Deng, Deformation and mechanical properties of the expansive cements produced by inter-grinding cement clinker and MgOs with various reactivities, *Constr. Build. Mater.* 80 (2015) 1–8. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.066.
- [19] H. Li, Q. Tian, H. Zhao, A. Lu, J. Liu, Temperature sensitivity of MgO expansive agent and its application in temperature crack mitigation in shiplock mass concrete, *Constr. Build. Mater.* 170 (2018) 613–618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.184.
- [20] V.C. Nguyen, F.G. Tong, V.N. Nguyen, Modeling of autogenous volume deformation process of RCC mixed with MgO based on concrete expansion experiment, *Constr. Build. Mater.* 210 (2019) 650–659. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.226.
- [21] L. Yu, M. Deng, L. Mo, J. Liu, F. Jiang, Effects of Lightly Burnt MgO Expansive Agent on the Deformation and Microstructure of Reinforced Concrete Wall, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2019 (2019) 1–9. doi:10.1155/2019/1948123.
- [22] M.A.A. Sherir, K.M.A. Hossain, M.

- Lachemi, Development and recovery of mechanical properties of self-healing cementitious composites with MgO expansive agent, *Constr. Build. Mater.* 148 (2017) 789–810. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.063.
- [23] M.A.A. Sherir, K.M.A. Hossain, M. Lachemi, The influence of MgO-type expansive agent incorporated in self-healing system of Engineered cementitious Composites, *Constr. Build. Mater.* 149 (2017) 164–185. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.109.
- [24] D. Chongjiang, A Review of Magnesium Oxide in Concrete, *Concr. Int.* (2005) 45–50.
- [25] P. Gao, X. Lu, F. Geng, X. Li, J. Hou, H. Lin, N. Shi, Production of MgO-type expansive agent in dam concrete by use of industrial by-products, *Build. Environ.* 43 (2008) 453–457. doi:10.1016/j.buildenv.2007.01.037.
- [26] T. I. Akin Altun (Department of Metallurgical and Materials Engineering, Dokuz Eylul University, 35100, Bornova-Izmir, T. Ismail Yilmaz (Filyos Refractories, Hisaronu-Zonguldak, Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1247–1249.
- [27] X. Lingling, D. Min, Dolomite used as raw material to produce MgO-based expansive agent, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1480–1485. doi:10.1016/j.cemconres.2004.09.026.
- [28] S.W. Choi, B.S. Jang, J.H. Kim, K.M. Lee, Durability characteristics of fly ash concrete containing lightly-burnt MgO, *Constr. Build. Mater.* 58 (2014) 77–84. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.080.
- [29] P.W. Gao, S.Y. Xu, X. Chen, J. Li, X.L. Lu, Research on autogenous volume deformation of concrete with MgO, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 998–1001. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.025.
- [30] A. Wang, M. Deng, D. Sun, L. Mo, J. Wang, M. Tang, Effect of combination of steel fiber and mgo-type expansive agent on properties of concrete, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 26 (2011) 786–790. doi:10.1007/s11595-011-0311-4.
- [31] ASTM, ASTM C1761: Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete 1 . . . , d (n.d.). doi:10.1520/C1761.
- [32] O.M. Jensen, P. Lura, Techniques and materials for internal water curing of concrete, *Mater. Struct. Constr.* 39 (2006) 817–825. doi:10.1617/s11527-006-9136-6.
- [33] D.P. Bentz, P. Lura, J.W. Roberts, Mixture Proportioning for Internal Curing, *Concr. Int.* 27 (2005) 35–40.
- [34] M. Valipour, K.H. Khayat, Coupled effect of shrinkage-mitigating admixtures and saturated lightweight sand on shrinkage of UHPC for overlay applications, *Constr. Build. Mater.* 184 (2018) 320–329. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.191.
- [35] D.P. Bentz, K.A. Snyder, Protected paste volume in concrete, *Cem. Concr. Res.* 29 (2002) 1863–1867. doi:10.1016/s0008-8846(99)00178-7.
- [36] AENOR, UNE 80112 Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la retracción de secado y del hinchamiento en agua., (2016).